

3.2 Entropie und Ökologie

A. Stahl "Du sollst nicht leichtfertig Entropie erzeugen!"

Lit. : A. Stahl, Praxis der Naturwiss - Physik 8, 21
(1997)

Ökolog. Bedeutung der Entropie als Maß für den Anteil der Energie, der in eine nicht mehr beliebig nutzbare Form verwandelt wurde.

Durchschnittl. "Energieverbrauch" eines Mitteleuropäers

150 kWh / Tag

Aber: Energie ist Erhaltungsgröße \rightarrow nicht "verbraucht"
sondern in "Wärmemüll" (niedrigwertige Energie)

Quantitativer Wertmaßstab der Energie: Entropie (2. HS)

Wertverlust der Energie = Entropiezunahme

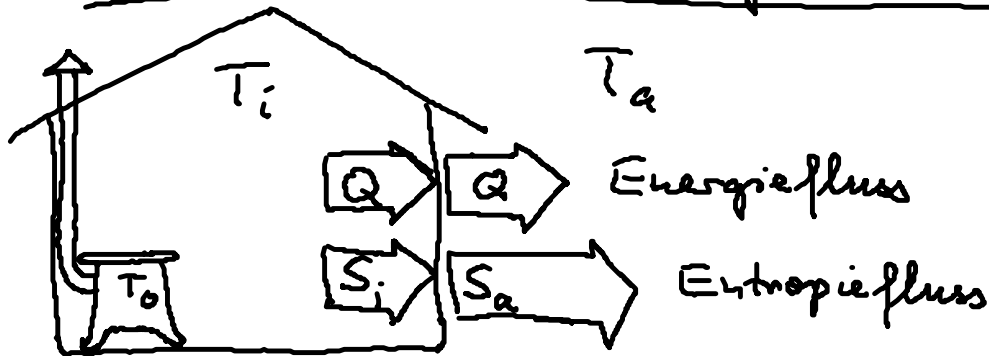
Beispiele :

(i) Umweltverschmutzung \rightarrow Entropiezunahme

(z.B. Verteilung von in Wasser gelösten Schadstoffen auf eine größere Wassermenge \rightarrow Mischungsentropie)

(ii) Ausrottung von Tier- u. Pflanzenarten
 (Zerstörung der genetischen Information)
 \rightarrow Zuwachs der Informationsentropie
 ca. $10^{-22} \frac{J}{K}$ pro Bit

(iii) Wärmeverlust der Heizung eines Hauses



$$S_i = \frac{Q}{T_i} < S_a = \frac{Q}{T_a}$$

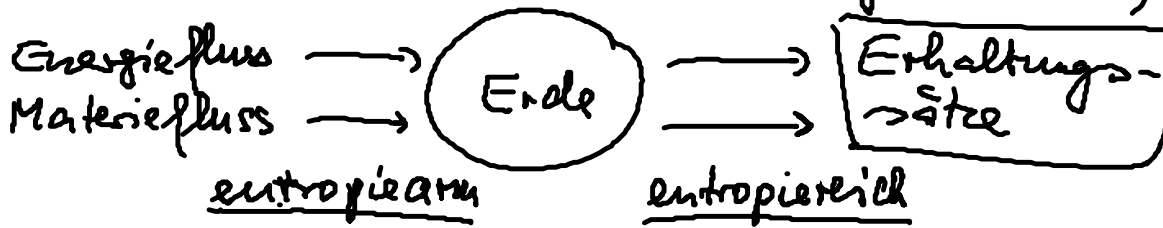
da $T_i > T_a$

\Rightarrow Entropieproduktion in der Wand $\Delta S = Q \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right)$

allg. : Wertverlust beim "Verbrauch" von Energie u. Rohstoffen = Entropieproduktion

Ökologisch sinnvoll wäre eine "Entropiesteuer"!

Offene dissipative Systeme (Lebewesen, Ökonomie, System Erde)

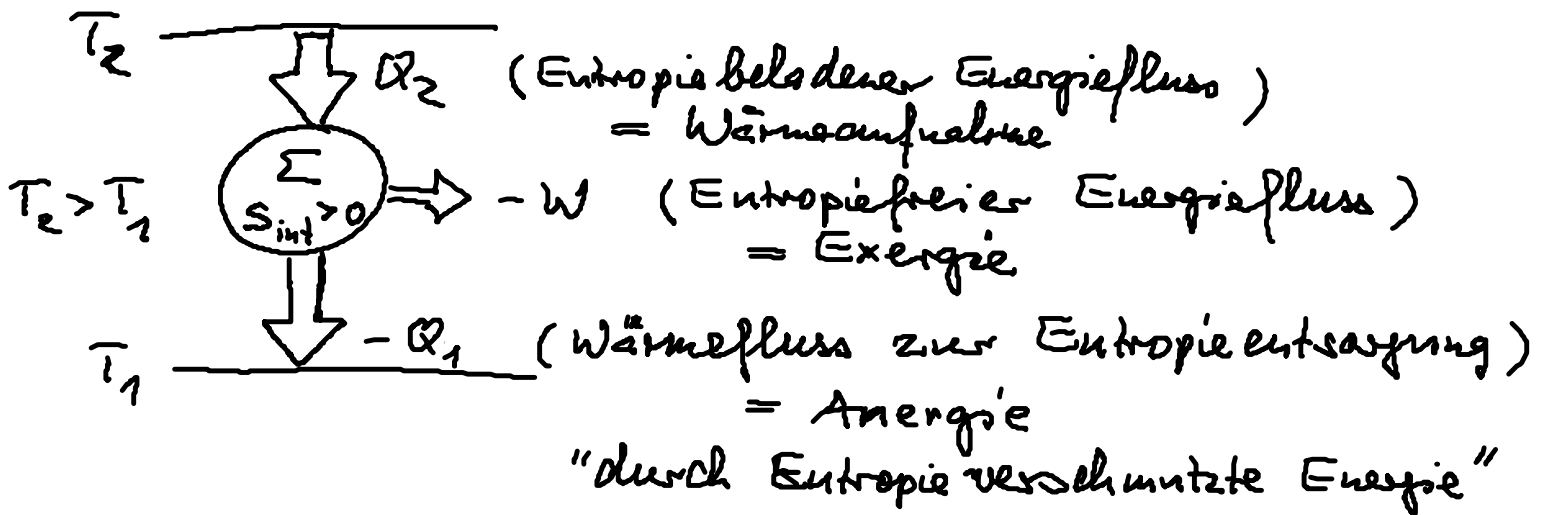


Entropieabfuhr $\hat{=}$ Müllabfuhr

Entropie bei irreversiblen Prozessen: keine Erhaltungsgröße

Beispiel:

(i) Irreversible Wärmekraftmaschine



$$Q_1 + Q_2 + W = 0 \quad \text{Energiebilanz}$$

$$\frac{-Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} + \underbrace{S_{int}}_{> 0} \quad \text{Entropieabgabe}$$

($S_{int} > 0$ (irrev. in der Maschine erzeugte Entropie))

irreversibler Wirkungsgrad $\eta_{irr} = \frac{-W}{Q_2} = 1 + \frac{Q_1}{Q_2}$

$$\eta_{irr} = 1 - \frac{T_1}{T_2} - \frac{S_{int}}{Q_2} \quad \left(\frac{S_{int}}{Q_2} > 0 \right)$$

(ii) Müllentsorgung

Müll = entropiereiche Materie

Zerstreuung u. Vermischung von Materie

z.B. N_G Getränkedosen

N_Z Joghurtbecher

N_M Milchtüten

N_Z Zahnpastatuben

$$N = N_G + N_Z + N_M + N_Z$$

Gegenstände in

Mülltonne

vorher: Entropie von 1 Getränkedose herausgehoben aus einer Ansammlung von N_G : $S = -k \ln \frac{1}{N_G}$

Entropie N_G Getränkedosen (ext.) $S = -k N_G \ln \frac{1}{N_G}$

Entropie von N_i Gegenständen ($i=1,2,3,4$),

geordnet in 4 Behältern: $S_{\text{vor}} = -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{1}{N_i}$

nachher: Entropie von $N = \sum_{i=1}^4 N_i$ Gegenständen nach Vermischung:

$$S_{\text{nach}} = -k N \ln \frac{1}{N} = -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{1}{N}$$

Mischungsentropie $S_{\text{mix}} = S_{\text{nach}} - S_{\text{vor}}$

$$= -k \sum_{i=1}^4 N_i \left(\ln \frac{1}{N} - \ln \frac{1}{N_i} \right)$$

$$= -k \sum_{i=1}^4 N_i \ln \frac{N_i}{N} > 0$$

Interpretation

Stirling-Formel $\ln(n!) \approx n \ln n$ (n groß)

$$\Rightarrow S_{\text{mix}} = -k \left(\underbrace{\sum_{i=1}^4 N_i \ln N_i}_{\approx \ln(N_i!)} - \underbrace{N \ln N}_{\approx \ln(N!)} \right)$$

$$\approx k \ln \frac{N!}{N_G! N_J! N_M! N_Z!}$$

Ω

Ω ist Zahl der Möglichkeiten der Anordnung der Elemente der Mülltonne (Permutationen mit Wiederholung)

- $\log_2 \Omega$ ist die Bitzahl (Information), um sämtl. mögl. Anordnungen durchzu nummerieren
- z.B. $N_G, N_J, N_M, N_Z \sim 10 \dots 100$

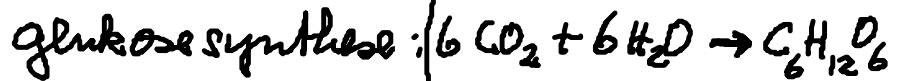
$$\Rightarrow S_{\text{mix}} \sim k \approx 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$\frac{\text{J}}{\text{K}}$ ist keine angepasste Entropieeinheit für Makroobjekte
sinnvoll wäre die Entropieeinheit "Bit"

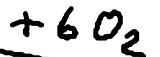
$$S_{\text{mix}} = \log_2 \Omega$$

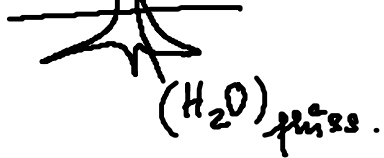
$$10^{23} \text{ Bit} = 1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

(iii) Photosynthese



Entropiebilanz pro Mol:





$$S_{in} = 6 S_{(CO_2)_{\text{gas}}} + 6 S_{(H_2O)_{\text{flüss.}}} + S_{\text{Stahl klein}}$$

$$S_{out} = S_{(\text{glukose})_{\text{fest}}} + 6 S_{O_2}$$

2. HS?

$$S_{out} \geq S_{in}$$

\Rightarrow

$$S_{out} < S_{in}$$

($\Delta S = -40$ Bit pro Glukosemolekül)

Erniedrigung der Entropie durch Biosynthese

Entsorgung der Entropie? $(H_2O)_{\text{flüss.}}$ $\xrightarrow{\text{Verdunstung}}$ $(H_2O)_{\text{Dampf}}$
entropiereich \rightarrow entropiereich

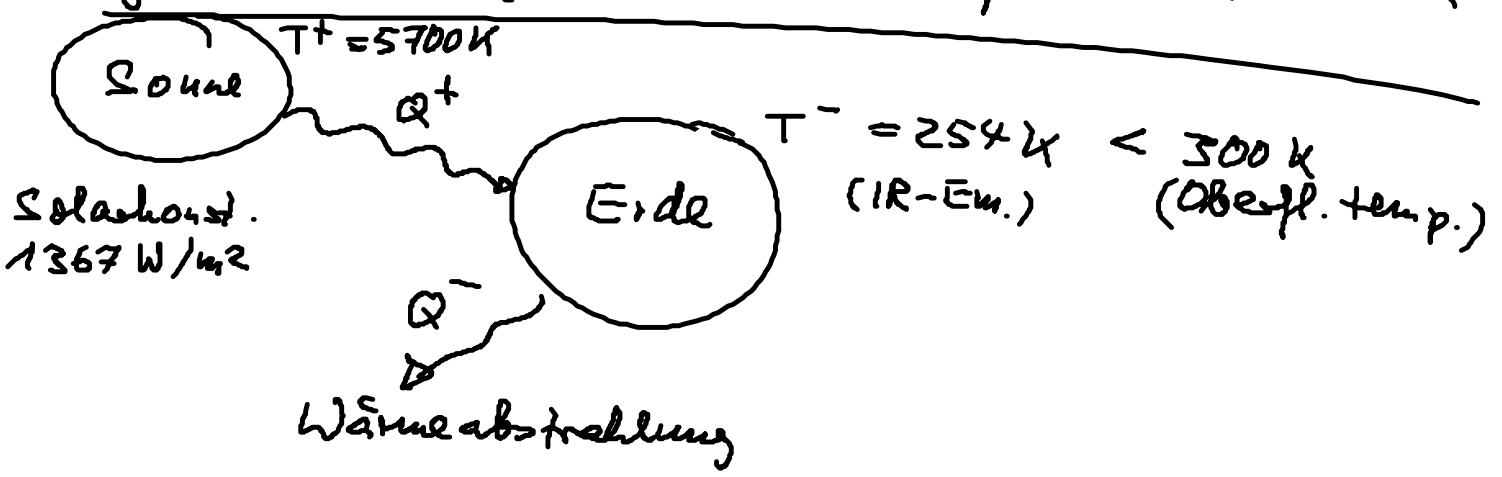
Verdunstungsentropie $18 \frac{\text{Bit}}{\text{Molekül } H_2O}$

\Rightarrow 2.2 Mol H_2O pro Mol Glukose verdunstet!

(iv) Ökosystem Erde

Entsorgung der Entropie ist nur Wärmeabstrahl. in den Weltraum möglich:

globale Energie- und Entropiebilanz der Erde



Energiebilanz: $Q^+ = Q^- \equiv Q$

Entropiebilanz: $\Delta S = \frac{Q^-}{T^-} - \frac{Q^+}{T^+} \approx \frac{Q}{T^-}$
 Entropieprod. abgeg. Entropie aufgen.

Entsorgungskapazität der Erde für dissipative Prozesse aller Art (Wetter, Leben, Wirtschaft)
 $\approx 1.2 \frac{W}{m^2 K}$ (aus Solarkonstante)

Physiolog. erzeugte Entropie pro Mensch $0.5 \frac{W}{K}$
 (Stoffwechsel)

Ökonom. " " (Deutschl.) $25 \frac{W}{K}$

$\hat{=} 2.5\%$ der max. Entsorgungskap.

(New York: 400%)

(weltweit: 0.5%)

Entropische Effizienz: $\epsilon = \frac{\Sigma_D}{\Sigma_{tot}} = \frac{\text{nutzliche Entropieerz.}}{\text{gesamte Entropieerz.}}$

$\eta \sim 90\%$

$\epsilon \sim 7\%$